

イージーラーメン橋載荷実験

(隅角部構造の耐荷力試験報告書)

平成 20 年 3 月

朝日エンジニアリング株式会社
金沢大学工学部土木建設工学科

1. はじめに

H形鋼を用いた床版橋とは、腹板に簡単な孔あけ加工を施したH形鋼を並べて、その孔に鉄筋を通して両端をナットで留め、桁上面鉄筋等を配置した後、桁間にコンクリートを打設して橋体を構築したものである¹⁾。この床版橋は、これまで鉄道橋として多く用いられてきたH鋼埋込み桁²⁾を道路橋用に改善した構造であり、支間長20m程度までの短支間橋梁を中心として現在50橋以上の施工実績がある。

著者らは、これまでにH形鋼とコンクリートとの合成効果の確認および並列配置したH形鋼同士の横分配挙動の確認をしてきた¹⁾。また、静的載荷による破壊挙動の確認、繰返し載荷時および繰返し載荷後の静的載荷による破壊挙動の確認などを行い、床版上部コンクリートの圧縮破壊までの耐力力を実験により把握し、十分な耐力力性能、耐疲労性能を有していることを明らかにした³⁾。

さらに、これに対して、近年の建設コストの縮減、維持管理費の軽減および耐震性能の向上という社会からの要求を満たすために、著者らは単純桁構造のH形鋼を用いた床版橋から支承および伸縮装置を設けないH形鋼を用いたラーメン構造を開発した。従来から、ラーメン橋は単純橋に比べて経済性、構造性に優れていることはよく知られているが、ラーメン隅角部の施工が複雑になることや設計計算が非常に煩雑となることから、短支間橋梁に用いられることが少ないのが現状であった。そこで著者らは、施工面で問題とされていたラーメン隅角部の構造を施工が容易にできるように改善した。

これまでのラーメン隅角部の構造は、鉄筋の配筋が複雑であった。これに対して、孔あき鋼板ジベル(PBL)を用いる方法などが提案されている。既往の研究^{4) -5)}では、主桁の上下フランジに孔あき鋼板を設置して橋軸直角方向鉄筋を孔に貫通させる方法が主に提案されている。

それに対して著者らは、橋台の主鉄筋としてネジ節異形鉄筋を用い、主桁のH形鋼上下フランジに開けた孔にそれを直接下から通して上フランジ位置においてナットで定着する方法を考えた。

本研究では、上述したラーメン隅角部の耐力力性能を確認するため、さらに隅角部の補強方法を検討するため、ラーメン隅角部試験体(片持ち梁構造)4体とラーメン構造試験体(門形ラーメン構造)1体を製作し、静的な載荷試験を行った。

参考文献

- 1) 徳野光弘, 津田和俊, 梶川康男, 深田幸史: H形鋼を用いた床版橋, 橋梁と基礎, Vol. 39, No. 2, pp. 49-55, 2005. 2.
- 2) 鉄道総合技術研究所 編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善, 2002. 12.
- 3) S. Fukada, Y. Kajikawa, M. Tokuno: Load-Carrying and Fatigue Capacity of Reinforced Concrete Slab Bridge with H-Shaped Steels, Proceedings of The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp.281-286, 2006.8.
- 4) 高木優任, 中村俊一, 室井進次: PBL を用いた複合ラーメン橋隅角部に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 1063-1074, 2003. 3.
- 5) 小浪尊宏, 蛭田健次, 安保瑠女, 千葉陽子: 鋼複合ポータルラーメン橋(中田春木川橋)の設計と実測, 橋梁と基礎, Vol. 42, No. 3, pp. 14-20, 2008. 3.

2. 押し抜きせん断試験

2.1 押し抜きせん断試験の概要

H形鋼に横繫ぎ鉄筋を通してネジ止め（仮止め程度）したものにコンクリートを打設した供試体を作成した。なお、H形鋼は無塗装、熔融亜鉛メッキ処理を施した2タイプを用い、それぞれ2体ずつ作成した。供試体の概要を図-2.1および写真-2.1に示す。この供試体に対して押し抜きせん断試験を行い、H形鋼とコンクリートとの一体性の確認および孔あき鋼板ジベルとしてせん断耐力について検討した。荷重状況を写真-2.2に示す。

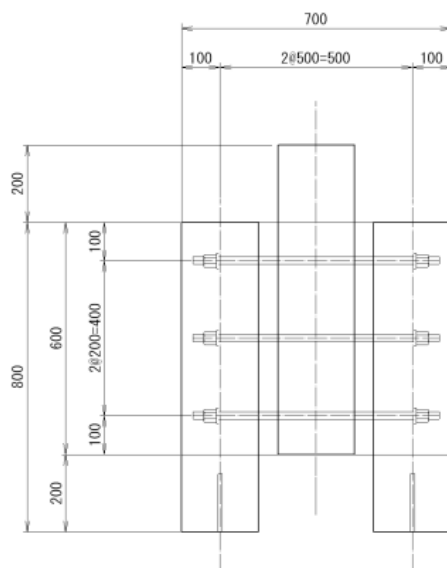


図-2.1 押し抜きせん断試験に用いた供試体の一般図



写真-2.1 コンクリート打設前の熔融亜鉛メッキ処理タイプの供試体（上面より撮影）

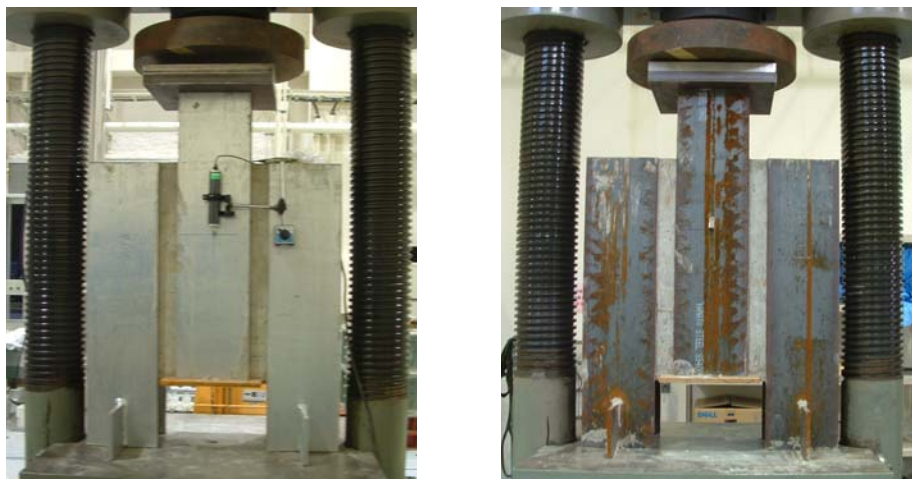


写真-2.2 荷重状況（左：熔融亜鉛メッキ処理タイプ、右：無塗装タイプ）

2. 2 押し抜きせん断試験の結果

押しぬきせん断試験の結果として載荷荷重と鉛直方向の相対変位（外側と内側の H 形鋼の相対変位）を図-2.2 に示す。

これより、無塗装およびメッキ処理ともに 1100kN 程度のせん断耐力を有しており、無塗装とメッキ処理の明確な耐力差は見られなかった。また、H 形鋼とコンクリートとの一体性については孔あき鋼板ジベルによるせん断耐力に依存していることがわかった。載荷後の写真を写真-2.3 に示す。

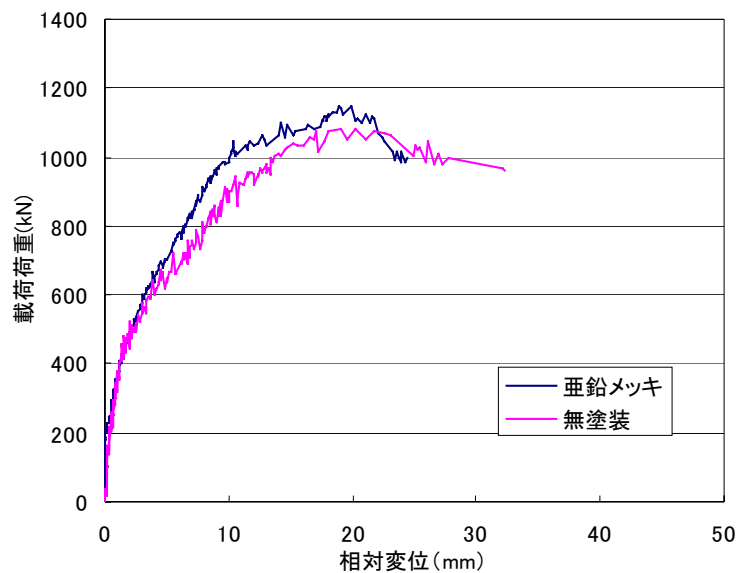


図-2.2 押し抜きせん断試験の結果

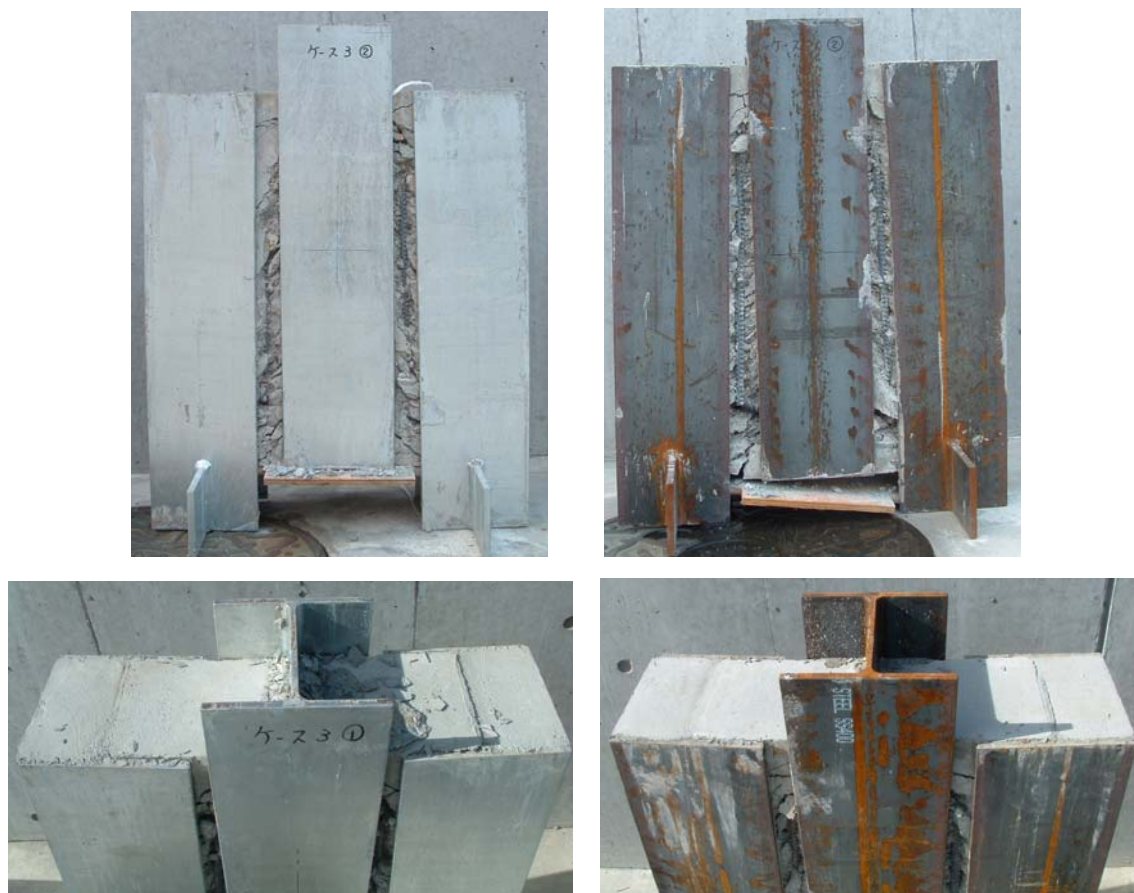


写真-2.3 載荷後の試験体

3. ラーメン隅角部・全体構造に対する載荷試験

3. 1 ラーメン隅角部・全体構造に対する載荷試験の目的

本載荷試験では、以下の目的により試験を行った。

- ①提案したラーメン隅角部構造における橋台主鉄筋とH形鋼との定着における終局までの挙動を把握する。
- ②H形鋼を用いた床版橋の実際の施工においては、耐久性の向上および維持管理費の縮減を考慮してH形鋼の桁全体に重防蝕塗装（溶融亜鉛メッキ処理）を施す場合が多い。そこで、無塗装および溶融亜鉛メッキ処理を施したH形鋼を用いた場合の終局挙動の違いを検討する。
- ③ラーメン隅角部におけるH形鋼から橋台主鉄筋への荷重伝達が均一になるように、また、隅角部の曲げ耐力を向上させるために、2主桁間に長さの短い補強桁を配置することを考えた。そこで、**図-3**に示すように桁端部の2主桁間に補強桁を配置したものと配置しないもので比較検討する。なお、補強桁がある場合、主桁間隔/H形鋼高は2.4（600/250）であり、補強桁がない場合は4.8（1200/250）となっている。

本載荷試験では、上記の目的に対して、ラーメン隅角部試験体を4体とラーメン全体構造の挙動を把握するためにラーメン構造試験体を1体製作した。なお、ラーメン隅角部試験体は、**表-3.1**に示すように、無塗装H形鋼と溶融亜鉛メッキ処理をしたH形鋼との比較、桁端部における補強桁の配置の有無を比較する試験体をそれぞれ作成した。

表-3.1 試験体ケース

	隅角部モデル				全体モデル
	亜鉛メッキ	無塗装	補強桁無	補強桁有	
Case1①	○		○		
Case1②		○	○		
Case2①	○			○	
Case2②		○		○	
Case3					○

3. 2 ラーメン隅角部・全体構造に対する載荷試験の試験体の諸元

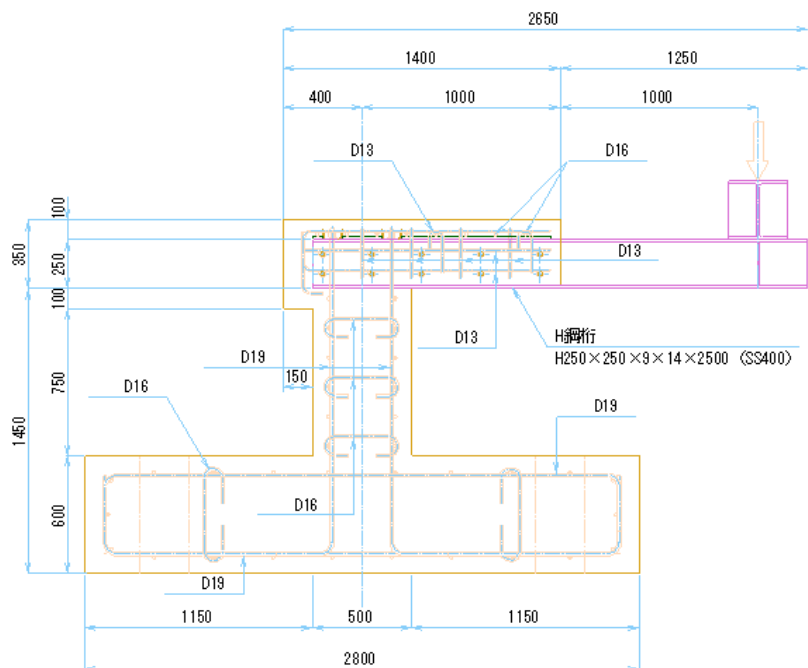
本研究で作成したラーメン隅角部試験体とラーメン構造試験体の諸元を以下に示す。なお、本試験体における設計活荷重はB活荷重として設計を行っている。コンクリートの設計基準強度はフーチング部:24N/mm²、橋台および主桁部:30N/mm²、鋼材材質としては、鉄筋:SD345、H形鋼:SS400（H250×250×9×14）を用いている。ラーメン隅角部試験体およびラーメン構造試験体の諸元を以下に示す。

ラーメン隅角部試験体（case2、補強桁有の場合）の側面図および平面図を**図-3.1**に、断面図（補強桁有無の場合）を**図-3.2**に示す。また、ラーメン隅角部試験体の写真を**写真-3.1**に示す。

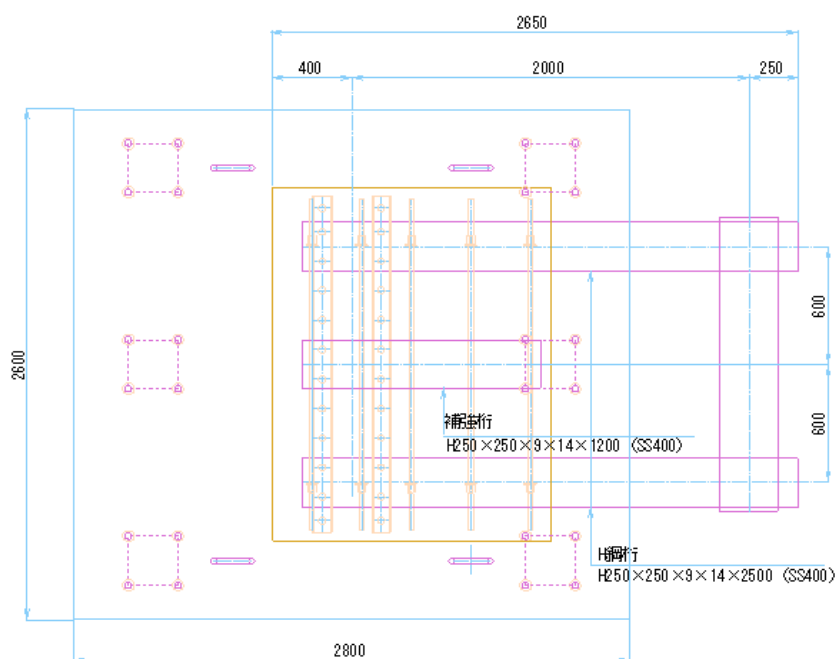
さらに、ラーメン構造試験体（case3）の断面図および側面図を**図-3.3**に、ラーメン構造試験体の写真を**写真-3.2**に示す。

<ラーメン隅角部試験体>

張り出し長	: 2.00m
幅員	: 1.80m
床版全高 (H形鋼高 0.25m)	: 0.35m
総高 (フーチング下面-床版上面)	: 1.80m
主桁間隔 (2 主桁)	: 1.20m
主桁間隔 (2 主桁+補強桁)	: 0.60m

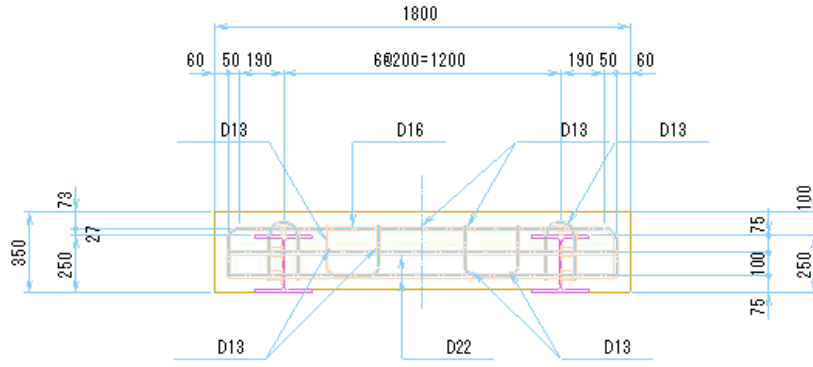


(a) 側面図

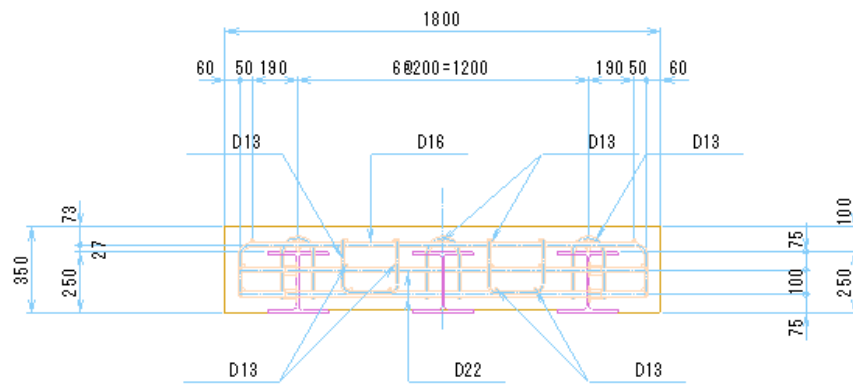


(b) 平面図

図-3.1 ラーメン隅角部試験体 (補強桁有 case2)



(a) ラーメン隅角部試験体（補強桁無 case1）



(b) ラーメン隅角部試験体（補強桁有 case2）

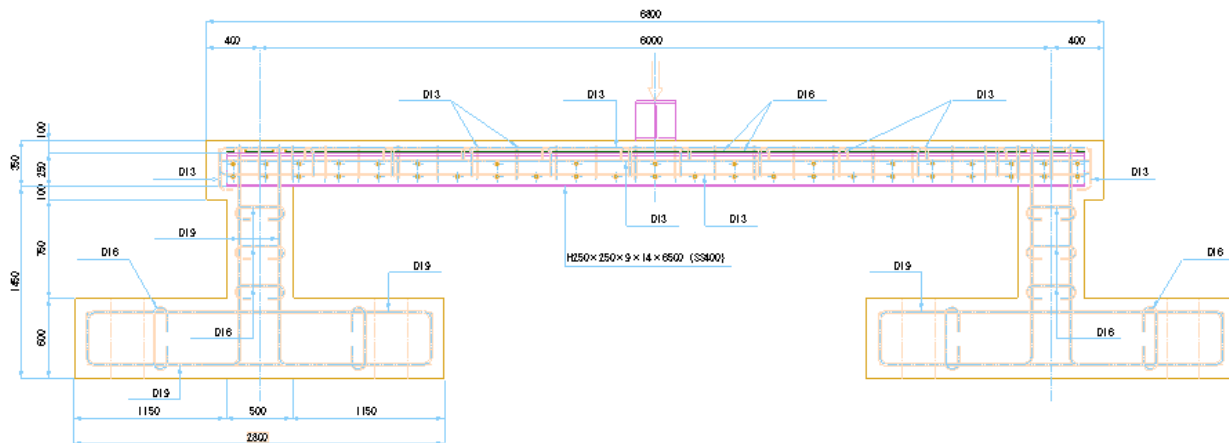
図-3.2 ラーメン隅角部試験体の断面図



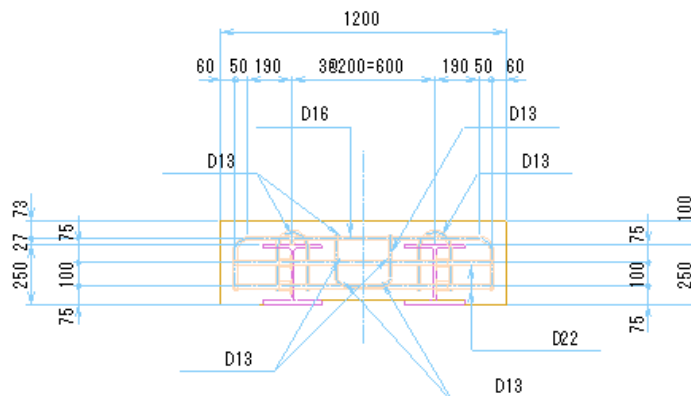
写真-3.1 ラーメン隅角部試験体

<ラーメン構造試験体>

支間長	: 6.00m
幅員	: 1.20m
床版全高 (H形鋼高 0.25m)	: 0.35m
総高 (フーチング下面-床版上面)	: 1.80m
主桁間隔	: 0.60m



(a) 側面図



(b) 断面図

図-3.3 ラーメン構造試験体 (case3)



写真-3.2 ラーメン構造試験体

3. 3 試験概要

荷重試験は、金沢大学所有の油圧サーボ式大型荷重試験装置(株島津製作所, 圧縮 3000kN, 引張 2000kN, ストローク±200mm)を用いた。荷重は、幅員中央に荷重した。静的荷重試験の荷重状況を写真-3.3に示す。



(a) ラーメン隅角部試験体



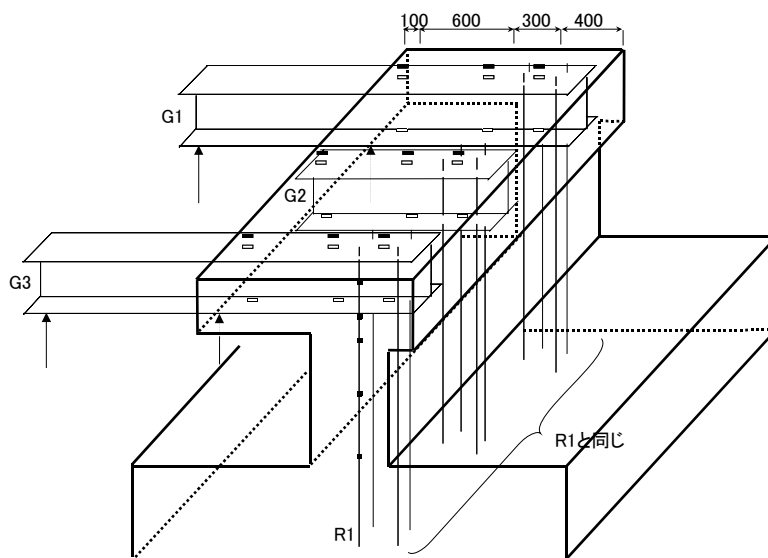
(b) ラーメン構造試験体

写真-3.3 静的荷重試験の荷重状況

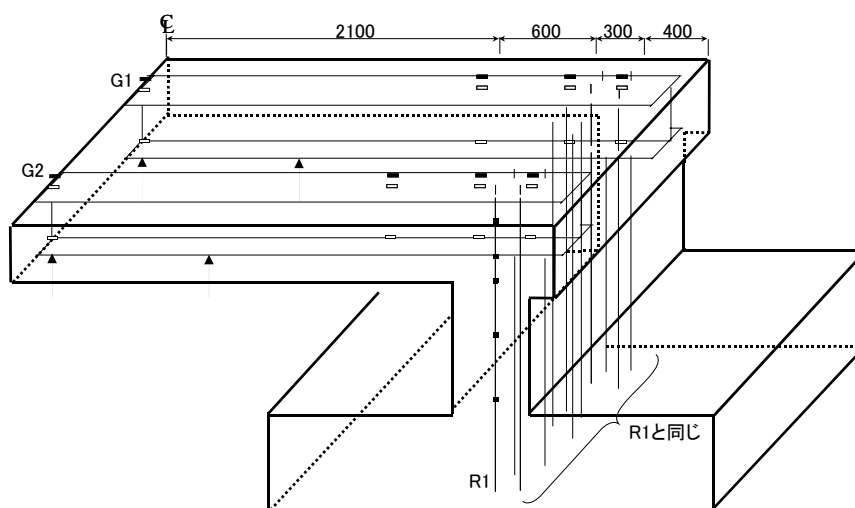
静的荷重試験における各試験体に対する測定項目は、ひずみおよび変位とした。測点の配置図を図-3.4に示す。なお、ラーメン隅角部試験体は補強桁有の場合を示したが、補強桁無の場合も同様な測点配置としている。

全体挙動としてたわみ性状を確認するために鉛直方向に変位計を設置した。変位計の設置位置は、ラーメン隅角部試験体の場合、荷重荷重位置と支点から荷重位置までの1/2点、ラーメン構造試験体の場合、支間1/2点、1/4点とした。

また、床版のコンクリート部およびH形鋼の応力性状、隅角部の橋脚主鉄筋の応力性状を確認するためにひずみゲージを設置した。なお、橋脚主鉄筋におけるひずみゲージの添付位置は、H形鋼ウェブ位置、下フランジ位置、床版と橋脚の打ち継ぎ部、橋脚高1/2点、橋脚基部の5箇所とした。



(a) ラーメン隅角部試験体（補強桁有）



(b) ラーメン構造試験体（支間 1/2 を記載）

↑	たわみ
—	コンクリート上面ひずみ
—	H形鋼上フランジひずみ
—	H形鋼下フランジひずみ
■	橋脚主筋ひずみ

図-3.4 測点配置図

4. 試験・解析結果

4.1 ラーメン隅角部試験体の破壊性状

ラーメン隅角部試験体における破壊性状は、以下のようにまとめることができる。括弧内は4ケースの試験体で得られた平均的な荷重を記載した。

- (A) 隅角部の床版上面に初期ひび割れが生じる (100kN)。
- (B) 橋台と床版との打ち継ぎ目が開く (140kN)。
- (C) 床版上面のひび割れが載荷点方向に進展する。
- (D) 橋台背面の壁高 1/2 点付近で水平方向にひび割れが生じる (325kN)。
- (E) 橋台と床版との打ち継ぎ目からのひび割れが進展して橋台前面でコンクリートの圧縮破壊が生じる (370kN)。

補強桁がない場合 (case1①) とある場合 (case2①) の溶融亜鉛メッキ処理を施した試験体のひび割れ図を図-4.1 に示す。補強桁の有無において最終的な耐力に違いはみられなかった。また、補強桁がない場合には上面 (○印) において橋軸方向のひび割れが見られた (写真-4.1 および写真-4.2 参照)。また、無塗装および亜鉛メッキの試験体と比較したが、破壊性状および破壊荷重は同じ傾向を示していた。また、写真-4.3～写真-4.6 に補強桁がある場合 (case2①) のひびわれ状況写真を示す。

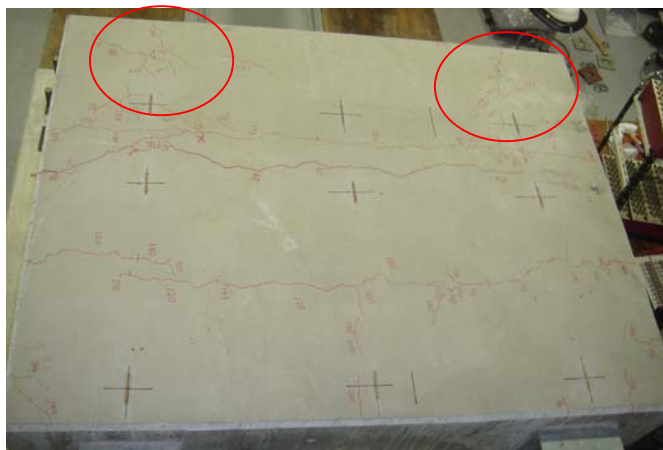


写真-4.1 ひびわれ状況 (上面より), 補強桁無, メッキ処理 (case1①)

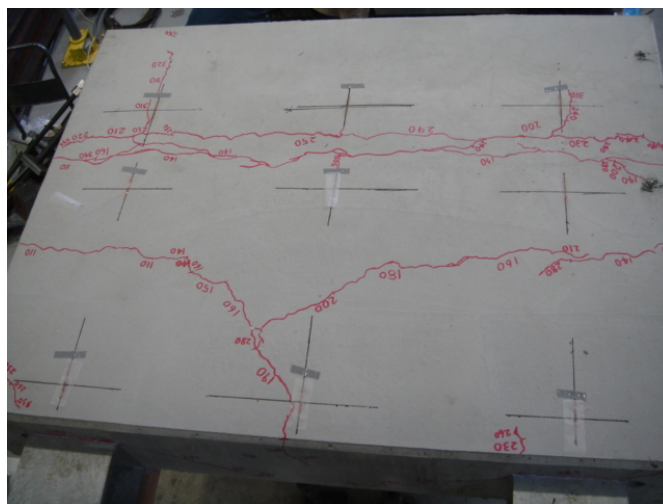
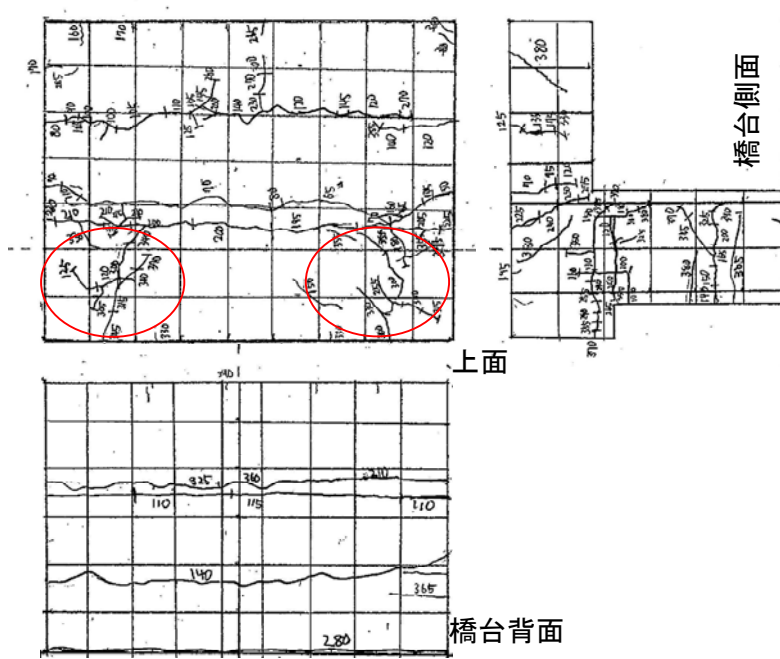
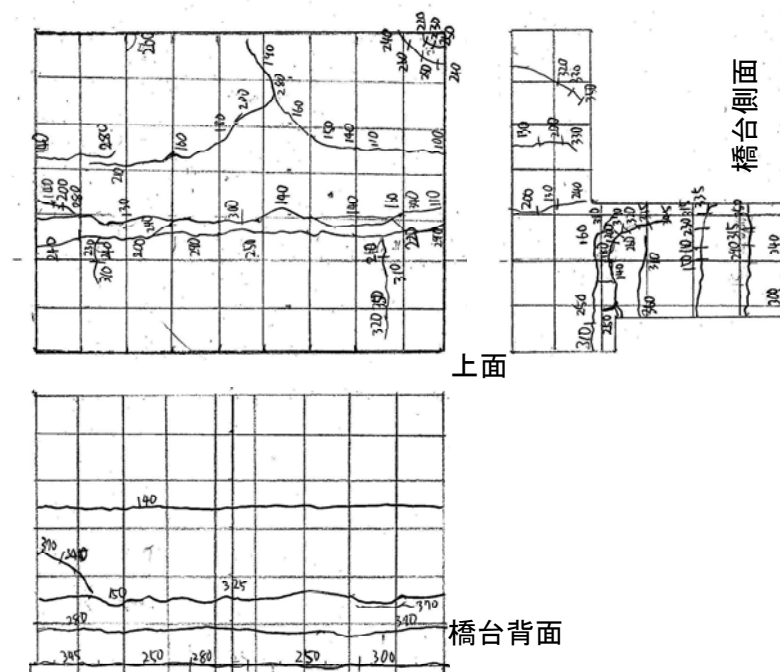


写真-4.2 ひびわれ状況 (上面より), 補強桁有, メッキ処理 (case2①)



(a) 補強桁無，メッキ処理 (case1①)



(b) 補強桁有，メッキ処理 (case2①)

図-4.1 ラーメン隅角部試験体のひび割れ図



写真-4.3 ひびわれ状況（側面より），補強桁有，メッキ処理（case2①）

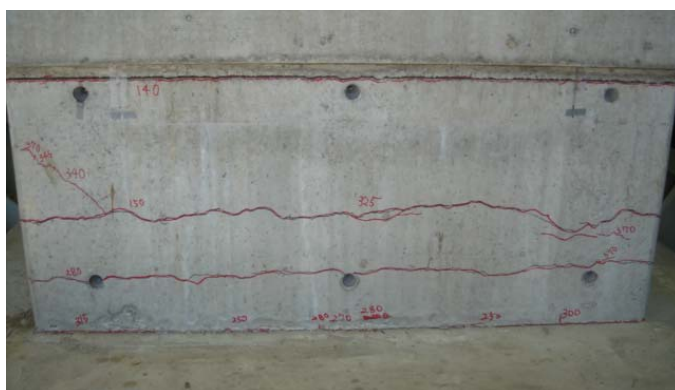


写真-4.4 ひびわれ状況（橋台背面より），補強桁有，メッキ処理（case2①）



写真-4.5 H形鋼まわり（前面）のひびわれ状況，補強桁有，メッキ処理（case2①）



写真-4.6 橋台前面の圧壊，補強桁有，メッキ処理（case2①）

4. 2 ラーメン構造試験体の破壊性状

ラーメン構造試験体におけるひび割れ図を図-4.2に示す。この試験体の破壊性状は、以下のようにまとめられ、ラーメン隅角部試験体と違い、最後は支間中央部のコンクリート床版上面で圧縮破壊が生じて終局状態となった。ひびわれおよび変形状況を写真-4.7～写真-4.12に示す。

- (A) 隅角近傍の床版上面に初期ひび割れが生じる (120kN)。
- (B) 支間中央の床版下面にひび割れが生じる (210kN)。
- (C) 橋台と床版との打ち継ぎ目が開く (240kN)。
- (D) 床版の隅角部および支間中央部におけるそれぞれのひび割れが進展する。
- (E) 橋台背面の壁高 1/2 点付近で水平方向にひび割れが生じる (570kN)。
- (F) 橋台と床版との打ち継ぎ目からのひび割れが進展して橋台内側に進展する。
- (G) 支間中央のコンクリート床版上面において圧縮破壊が生じる (1000kN)。

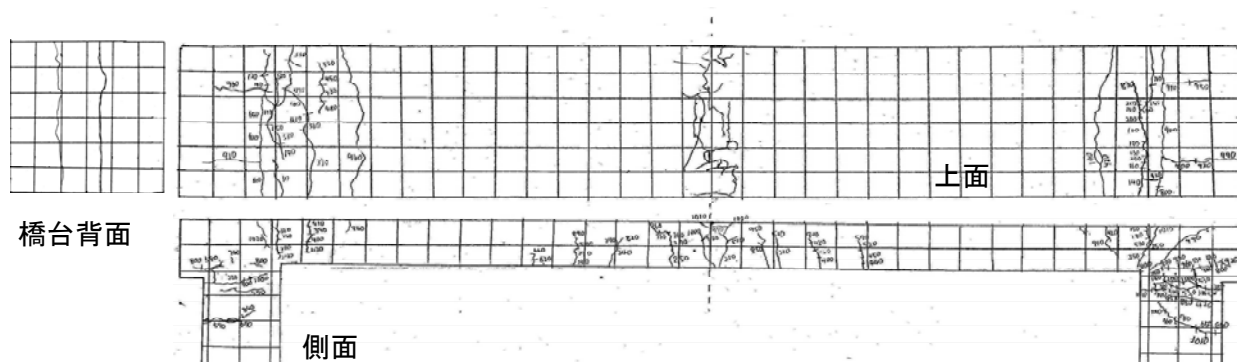


図-4.2 ラーメン構造試験体のひび割れ図

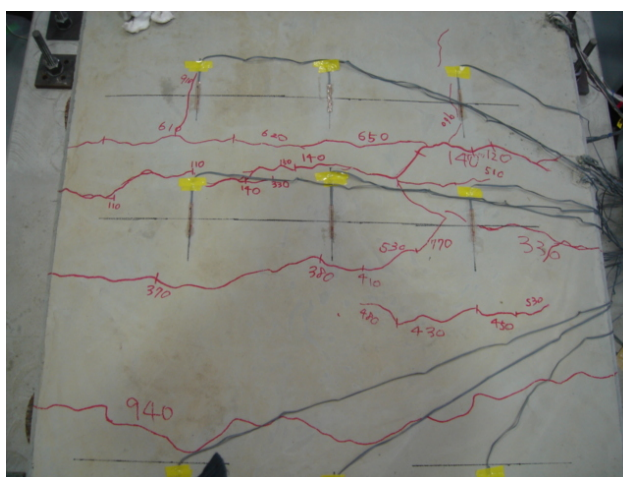


写真-4.7 隅角部上面におけるひびわれ

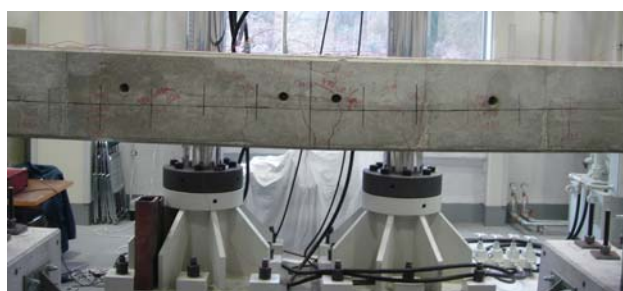


写真-4.8 支間中央における側面のひびわれ



写真-4.9 橋台部の打ち継ぎ部の開き

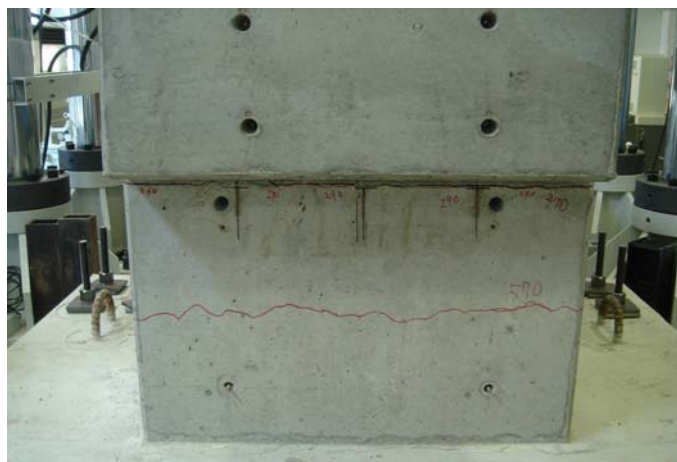


写真-4.10 橋台背面におけるひびわれ

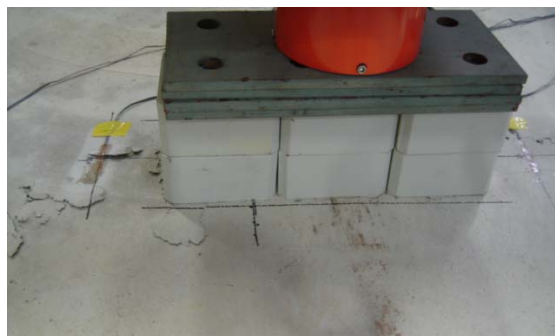


写真-4.11 支間中央における荷重載荷点での圧壊

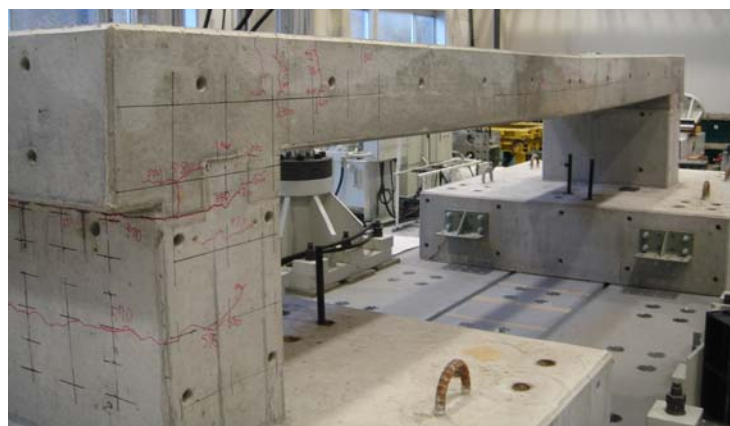


写真-4.12 荷重除荷後の残留変形

4. 3 荷重－変位関係

4. 3. 1 ラーメン隅角部試験体

ラーメン隅角部試験体を対象として、各試験体の載荷点における荷重－変位関係を図-4.3に示す。これより、上述したように、約300kNまでは荷重の増加とともに変位も増加しているが、橋脚の主鉄筋が降伏した後に橋脚と床版との打ち継ぎ目が大きく開きだし、鉛直変位の勾配が変化していることがわかる。

次に、無塗装およびメッキ処理を施したH形鋼とコンクリートとの付着力の影響、桁端部に配置した補強桁の有無の影響を見るためにそれぞれのケースで比較する。無塗装 (case1② or case2②) およびメッキ処理 (case1① or case2①) とともに載荷点における荷重－変位関係では顕著な違いをみることができなかった。また、補強桁の有無の影響について比較すると、補強桁のあるケース (case2) の方は、補強桁のないケース (case1) に比べて、桁端部の補強桁の剛性分だけ荷重－変位曲線の傾きが増加していることがわかる。このように、無塗装とメッキ処理および補強桁の有無それぞれを比較してみても、荷重－変位関係に及ぼす影響は小さいと考えられる。

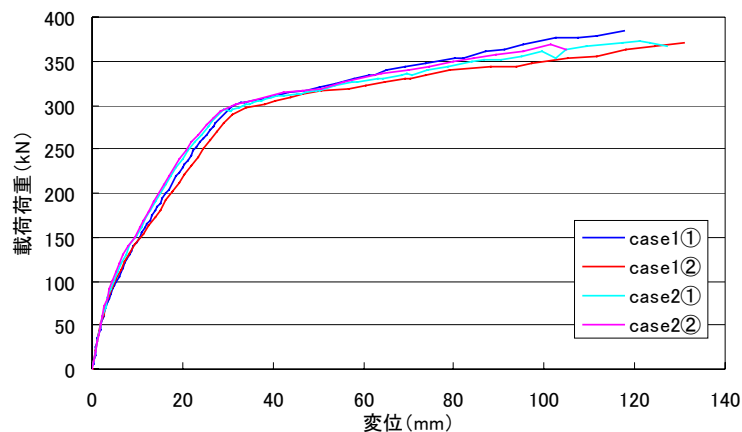


図-4.3 載荷点における荷重－変位 (隅角部試験体)

4. 3. 2 ラーメン構造試験体

ラーメン構造試験体を対象として、載荷点 (支間 1/2 点) における荷重－変位関係を図-4.4に示す。支間 1/2 点において約 1000kN で 40mm 程度のたわみが計測され、支間中央のコンクリート床版上部の圧縮破壊で終局状態となった。

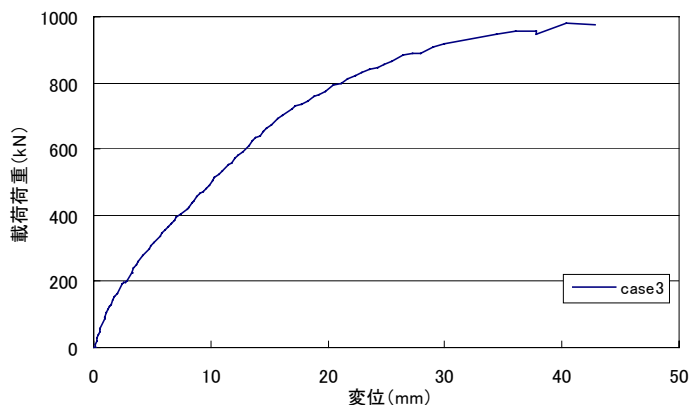


図-4.4 支間中央における荷重－変位関係 (ラーメン構造)

4. 4 荷重－ひずみ関係

4. 4. 1 ラーメン隅角部試験体における隅角部ひずみ

橋台前面の断面における H 形鋼上フランジのひずみに着目し、載荷荷重－ひずみの関係を図-4.5 に示す。補強桁がない場合 (case1①と②) は、橋台の主鉄筋が降伏した後に H 形鋼の上フランジが降伏し、塑性化しているが、補強桁がある場合は、降伏しなかった。

今回の試験体のうち、補強桁のない場合の主桁間隔/H 形鋼高は 4.8 (1200/250) となっているが、上記の結果より、H 形鋼の方が、橋台主鉄筋より先に降伏しなかったことから、今後の実用化に際しては安全性を考慮して 4.0 程度 (主桁間隔 1000mm) まで補強桁の必要性がないと考えられる。

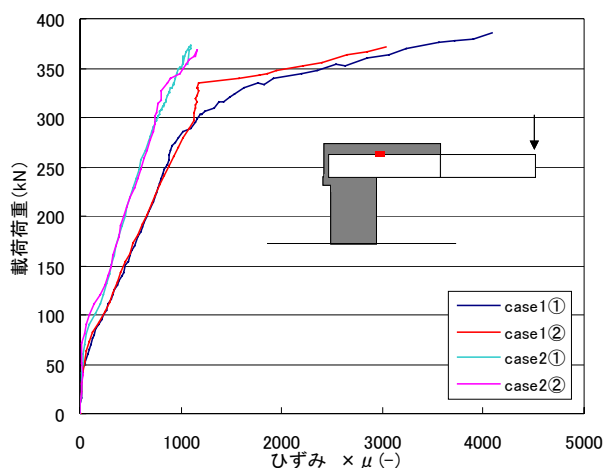


図-4.5 H 形鋼上フランジにおける荷重－ひずみ

また、桁間隔が広い場合、隅角部の補強として長さの短い補強桁を配置することが有効であることもわかった。橋台の各断面における主鉄筋に着目し、載荷荷重－ひずみの関係を図-4.6 に示す。これより、各断面でみると、H 形鋼ウェブ位置 (1 段目) においては弾性域のままとなっており、H 形鋼下フランジ位置 (2 段目) と打ち継ぎ部 (3 段目) において塑性化がみられる。特に、打ち継ぎ部 (写真-4.13 参照) においては、打ち継ぎ目の開きが要因となっている。

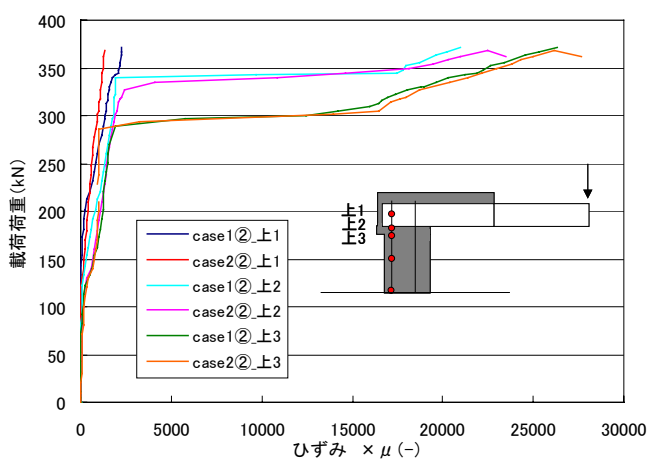


図-4.6 橋台主鉄筋における荷重－ひずみ

これより、定着部付近で塑性化が生じず、定着ナットの破損等も確認されなかったことから、ネジ節異形鉄筋と定着ナットを用いたH形鋼との定着方法において問題が生じないことがわかった。また、図-4.5 および図-4.6 から無塗装および亜鉛メッキの試験体で比較したが、それぞれのひずみはほぼ同じ傾向を示していた。また、主鉄筋では補強桁の有無による顕著な違いがみられなかった。



写真-4.13 打ち継ぎ目（点線部）からの開き

4. 4. 2 ラーメン構造試験体における隅角部のひずみ

ラーメン構造試験体における隅角部のひずみとして、橋台の主鉄筋の載荷荷重－ひずみの関係を図-4.7 に示す。

隅角部試験体と同様に打ち継ぎ目からの開きが影響して打ち継ぎ部（上3段目）のみが降伏して塑性化していることがわかる。これより、ラーメン構造の試験体においてもネジ節異形鉄筋と定着ナットを用いた定着部が破壊するなどの問題が生じないことを確認した。

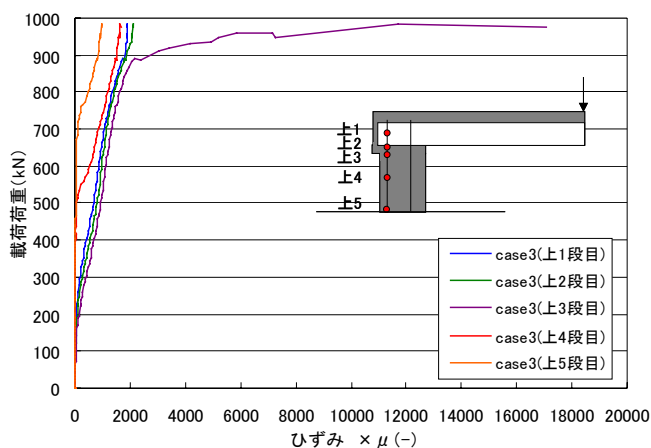


図-4.7 橋台の主鉄筋の載荷荷重－ひずみの関係

<付録（ラーメン隅角部試験体の工事写真）>



写真-1 橋台部の配筋



写真-2 橋台部フーチングの打設



写真-3 橋台部の躯体部の打設

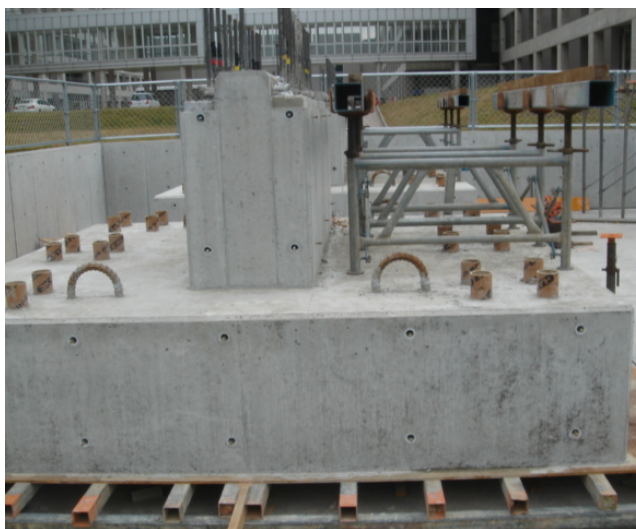


写真-4 橋台部の完成



写真-5 H形鋼の設置と鉄筋の配筋（側面より）



写真-6 H形鋼の設置と鉄筋の配筋（上面より）